

# Анализ геометрии системы стабилизации и наведения при использовании технического зрения

## Analysis of the geometry of the stabilization and guidance system using technical vision

УДК 681.5

Получено: 14.08.2023

Одобрено: 02.09.2023

Опубликовано: 25.09.2023

### **Михед А.Д.**

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборы управления» Тульского государственного университета

e-mail: anton11588@yandex.ru

### **Mikhed A.D.**

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Control Devices» of Tula State University

e-mail: anton11588@yandex.ru

### **Токарев В.Л.**

Д-р техн. наук, профессор кафедры «Информационная безопасность» Тульского государственного университета

e-mail: tokarev22@yandex.ru

### **Tokarev V.L.**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department «Information security» of Tula State University

e-mail: tokarev22@yandex.ru

### **Аннотация**

Проведен анализ геометрии при координатном совмещении системы стабилизации и наведения с техническим зрением. Показаны связи линейных и угловых координат совмещенных систем. Полученные выражения определили непосредственную зависимость между пиксельными координатами матрицы видеокамеры и углами поворота рам карданова подвеса системы стабилизации и наведения. Затронута проблема использования декартовых координат и их перевод в однородные.

**Ключевые слова:** система наведения, линия визирования, техническое зрение, OpenCV, матрица видеокамеры, система стабилизации.

### **Abstract**

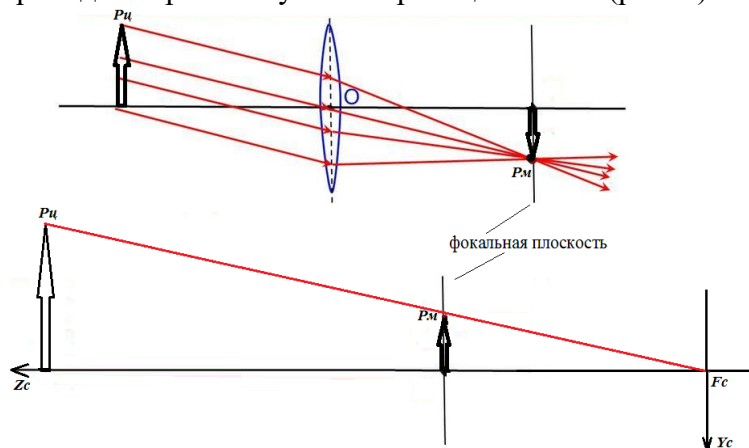
The analysis of geometry with the coordinate combination of the stabilization and guidance system with technical vision is carried out. The connections of linear and angular coordinates of combined systems are shown. The expressions obtained determined the direct relationship between the pixel coordinates of the video camera matrix and the rotation angles of the gimbal frames of the stabilization and guidance system. The problem of using Cartesian coordinates and their translation into homogeneous ones is touched upon.

**Keywords:** guidance system, line of sight, technical vision, OpenCV, video camera matrix, stabilization system.

Одним из недостатков систем стабилизации и наведения (ССиН) линии визирования (ЛВ) является то, что такие системы способны осуществлять наведение оптической ЛВ только на одну цель, без поддержки слежения других целей, если в поле зрения имеются несколько объектов наблюдения [1]. Устранение данного недостатка может быть осуществлено при применении технического зрения. Совмещение ССиН и технического зрения дает возможность наведения ЛВ на одну цель и слежения за другими целями на заданном расстоянии. Для определения требуемых углов наведения на цель необходимо провести анализ геометрии ССиН на основе технического зрения [2].

Системы технического зрения производят анализ информации, получаемого оптического изображения. Преобразование изображения в поток цифровой информации или электрические сигналы осуществляется с помощью матрицы устройства видеонаблюдения. Информация по изображению поступает в систему технического зрения, которая может производить распознавание и обнаружение объекта. Для реализации алгоритмов технического зрения, обработки численных алгоритмов и изображений используют библиотеку общего назначения OpenCV с открытым кодом.

Согласно известным законам собирающей геометрической оптики изображение на фокальной плоскости может строиться с помощью собирающей линзы. Уменьшенное изображение проецируется в перевернутом виде [3]. При съёмке изображений фокальная плоскость совпадает с фотоматериалом или фотоматрицей. Главная оптическая ось имеет горизонтальное расположение и проходит через точку  $O$  собирающей линзы (рис. 1).



**Рис. 1.** Построение изображения на фокальной плоскости (верхний рисунок – при использовании собирающей линзы, нижний – для определения центра координат камеры)

Для определения декартовой трехмерной системы координат, связанной с камерой  $F_c X_c Z_c Y_c$  перевернем изображение фокальной плоскости и проведем прямую линию, образованную двумя точками  $P_c$  и  $P_m$ . Где  $P_c$  – это точка объекта наблюдения или цели, определенная в трехмерной системе координат, а  $P_m$  – точка в фокальной плоскости декартовой двухмерной системы координат. Ось  $Z_c$  совпадает с главной оптической осью, ось  $X_c$  направлена вниз и перпендикулярна  $Z_c$ . Точка пересечения  $F_c$  координатных осей камеры располагается на пересечение отрезка, образованного двумя точками  $P_c$  и  $P_m$ . Все точки, лежащие на отрезке  $P_c P_m$  будут проецироваться в одну точку  $P_m$  фокальной плоскости.

Библиотека OpenCV является самой популярной и часто используемой в системах технического зрения. Данная библиотека совместно с камерой образуют модель OpenCV. Ее особенность заключается в том, что используется виртуальная плоскость изображения, которая представлена матрицей камеры. Объект наблюдения в 3Д пространстве проецируется в 2Д плоскость матрицы, координаты которой представляются пикселями.

На рис. 2 представлены системы координат и плоскости для модели камеры OpenCV. Введем систему координат, связанную с фотоматрицей  $O_m x_m y_m z_m$  и систему координат  $F_c X_c Y_c Z_c$ , связанную с центром  $F_c$ . Оси  $F_c Z_c$  и  $O_m z_m$  совпадают, а оси  $F_c X_c$  и  $O_m x_m$  параллельны [4].

Техническое зрение определяет объект, который становится целью в виде точки  $P_{ц}$  в плоскости  $ABCD$  для информационно-измерительной системы. В плоскости матрицы цель определяется точкой  $P_{м}$  с координатой  $u, v$  по осям  $x_{м}, y_{м}$ . Плоскость  $ABCD$  параллельна плоскости матрицы и находится на расстоянии  $S1$  от неё. Системы координат  $O_{м}, x_{м}, y_{м}, z_{м}$  и  $OXYZ$  удалены друг от друга на расстояние  $S2$  относительно оси  $F_c Z_c$ . Относительно отрезка  $AB$  определяется высота  $H$  цели [5].

Центральная линия  $F_c O_{м}$  является оптической осью ЛВ. В двухосных информационно-измерительных ССИН ЛВ наводят на цель по углам поворота рамок карданова подвеса. Введем угол поворота  $\varphi_A$  относительно оси  $F_c Y_c$  и угол  $\varphi_B$  относительно оси  $F_c X_c$ .

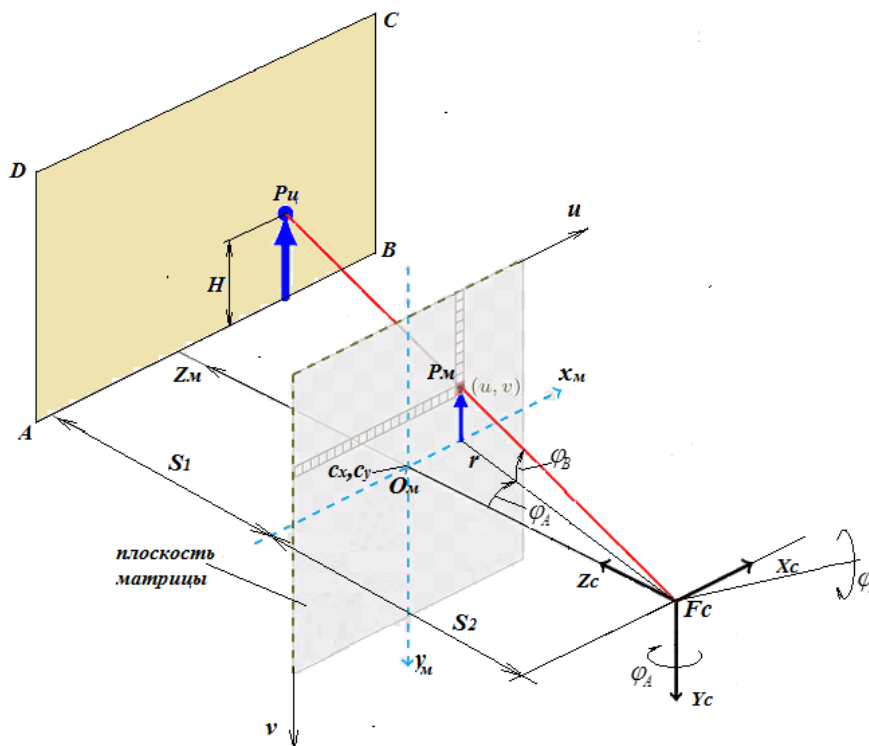


Рис. 2. Связи линейных и угловых координат в системе технического зрения

При использовании технического зрения необходимо установить зависимости между пиксельными координатами матрицы и углами поворота ССИН [6].

Модель OpenCV параметризуется на матрице четырьмя числами, измеряемых в пикселях:  $f_x, f_y, c_x, c_y$ . Параметры  $f_x, f_y$  определяют ширину и высоту пикселя, а  $c_x, c_y$  задают центр изображения на матрице. При симметричном расположении центра матрицы точка  $c_x, c_y$  совпадает с точкой  $O_{м}$ . В некоторых случаях центр изображений может быть смещен. Например, если часть объектива камеры загрязнена или сделанный кадр получился обрезанным [7].

Запишем формулы для преобразования координат точки  $(x, y)$  в точку  $(u, v)$  на изображении фотоматрицы:

$$u(x) = f_x \cdot x + c_x, v(y) = f_y \cdot y + c_y \quad (1)$$

При угловых поворотах  $\varphi_A, \varphi_B$  произойдет переход отрезка  $F_c O_{м}$  к  $F_c P_{м}$  с образованием отрезка  $r$ . Для полученных в результате поворота прямоугольных треугольников справедливы соотношения [8]:

$$\begin{aligned}\varphi_A &= \arctg\left(\frac{x}{S_2}\right), r = \sqrt{S_2^2 + x^2}, \\ \varphi_B &= \arctg\left(\frac{y}{\sqrt{S_2^2 + x^2}}\right).\end{aligned}\quad (2)$$

С учетом формул (1) запишем соотношения (2) в следующем виде:

$$\begin{aligned}\varphi_A &= \arctg\left(\frac{u(x) - c_x}{S_2 \cdot f_x}\right), \\ \varphi_B &= \arctg\left(\frac{v(x) - c_y}{\sqrt{S_2^2 + \left(\frac{u(x) - c_x}{f_x}\right)^2}}\right).\end{aligned}\quad (3)$$

Полученные выражения (3) определяют непосредственную зависимость между пиксельными координатами матрицы и углами поворота  $\varphi_A, \varphi_B$ .

Рассмотрим случай, когда цель определяется в системе координат, связанной с видеокамерой  $F_c X_c Y_c Z_c$ . Точки  $P_M$  и  $F_c$  образуют прямую линию, уравнение которой имеет вид:

$$\frac{X_c - F_c(X_c)}{u(X_c) - F_c(X_c)} = \frac{Y_c - F_c(Y_c)}{v(Y_c) - F_c(Y_c)} = \frac{Z_c - F_c(Z_c)}{Z_c(P_M) - F_c(Z_c)}, \quad (4)$$

где  $F_c(X_c), F_c(Y_c), F_c(Z_c)$  - координаты точки  $F_c$ ,  $u(X_c), v(Y_c)$  - проекции координат точки  $P_M$  на оси  $X_c, Y_c$ ;  $Z_c(P_M)$  - координата пересечения плоскости фотоматрицы и оси  $F_c Z_c$ .

В рассматриваемом случае координаты точки  $F_c$  равны нулю, а  $Z_c(P_M) = S_2$  тогда уравнение 4 примет простой вид:

$$\frac{X_c}{u(X_c)} = \frac{Y_c}{v(Y_c)} = \frac{Z_c}{S_2}, \quad (5)$$

При проектировании информационно-измерительных систем технического зрения параметр  $S_2$  является известным. Модель OpenCV позволяет автоматически определять координаты  $u(X_u)$  и  $v(Y_u)$  по изображению. Координата  $Z_c$  будет являться расстоянием до цели. Координаты точки цели  $P_u$  найдем из условия, при котором три точки  $P_u, P_M$  и  $F_c$  будут лежать на одной прямой:

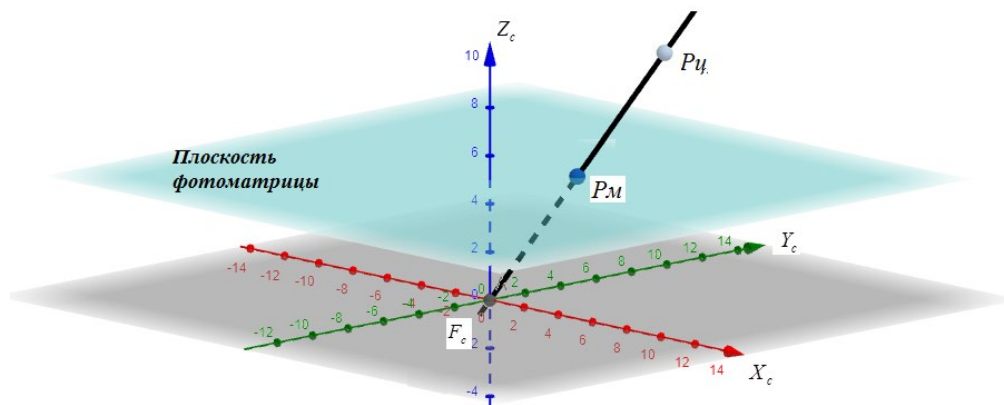
$$\frac{Y_c(P_u) - F_c(Y_c)}{v(Y_u) - F_c(Y_c)} = \frac{X_c(P_u) - F_c(X_c)}{u(X_u) - F_c(X_c)}, \quad (6)$$

Так как  $F_c(Y_c) = F_c(X_c) = 0$ , то уравнение 6 примет вид:

$$\frac{Y_c(P_u)}{v(Y_u)} = \frac{X_c(P_u)}{u(X_u)} \quad (7)$$

Уравнение 7 показывает соотношение координат линии  $F_c P_u$  и позволяет рассчитать координаты цели  $Y_c(P_u)$  и  $X_c(P_u)$  в системе координат, связанной с камерой.

На рис. 3 показан пример системы координат камеры и прямой линии, образованной точками  $P_u, P_M, F_c$ , при координатах  $u(X_c) = 2 \text{ мм}$  и  $v(Y_c) = 3 \text{ мм}$  и параметре  $S_2 = 5 \text{ мм}$  ( $Y_c(P_u) = 6 \text{ мм}$ ,  $X_c(P_u) = 4 \text{ мм}$ ).



**Рис. 3.** Система координат камеры и прямая линия, образованной точками  $P_{ц}$ ,  $P_{м}$ ,  $F_c$

Проблема использования декартовых координат фотоматрицы заключается в том, что с точки зрения алгебраических операций, декартовы координаты не позволяют провести различия между точками и векторами в пространстве. Декартовы координаты не позволяют использовать матричную запись для задания перспективного преобразования (проекции) точек. Поэтому в техническом зрении также используют однородные координаты.

Перевод из однородных координат в координаты фотоматрицы системы координат камеры можно осуществить с помощью преобразования:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \Rightarrow \left( \frac{X_c}{Z_c}, \frac{Y_c}{Z_c} \right), \quad (8)$$

Для определения проекции на плоскость фотоматрицы известную координату цели  $(X_c, Y_c, Z_c)$  нужно преобразовать к виду  $(\frac{X_c}{Z_c}, \frac{Y_c}{Z_c}, 1)$ . Таким образом, для плоскости фотоматрицы  $Z_c = 1$ , а  $F_c$  сохранит свое нулевое положение.

## Литература

1. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч.2. Гироскопические стабилизаторы / под ред. Д.С. Пельпора. М.: Высш. школа, 1977, 223 с.
2. Думчев С.В., Думчев Е.В. Стабилизация изображения, полученного со статически установленной видеокамеры. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. № 9-1, 2014, с. 64-70.
3. Смирнов В.А., Славгородский Д.А. Влияние кинематических погрешностей на точность системы стабилизации и наведения линии визирования // Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы. 2020, № 1, с.16 – 18.
4. Михед А.Д., Кожеуров М.А., Родионов В.А. К вопросу повышения точности информационно измерительных систем стабилизации и наведения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015, Вып. 12. Ч. 1, с. 210 – 215.
5. Родионов В.И., Михед А.Д. Динамика системы стабилизации и наведения линии визирования с двухосным наклонным кардановым подвесом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Технические науки. 2011. Вып. 2. с. 191 – 195.
6. Родионов В.И., Михед А.Д. Геометрия системы стабилизации и наведения с наклонным расположением карданова подвеса. // Приводная техника. 2011. №2. с.34 – 37.

7. Михед А.Д., Родионов В.И., Смирнов В.А. Кинематика и динамика двухосной системы стабилизации и наведения линии визирования, учитывающая особенности движения зеркала // Инженерная физика 2010. №11. с.20 – 24.
8. Родионов В.И. Гирскопические системы стабилизации и управления: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2000. 192 с.